

博士論文概要

論文題目

トンネル覆工体に用いる鋼繊維補強コンクリートの
引張軟化曲線に関する研究

Study on Tension-softening Curves of
Steel Fiber Reinforced Concrete for Tunnel Lining

申請者

川口	博行
Hiroyuki	Kawaguchi

2005 年 5 月

鋼繊維補強コンクリート（Steel Fiber Reinforced Concrete，以降，SFRCと略称する）は，コンクリート中に単位容積あたり 0.3～2.0%の鋼繊維をほぼ一様に分散させ配向させた複合材料であり，これによりコンクリートの諸性質は大幅に改善される．鋼繊維による改善効果としては，曲げ強度，せん断強度，靱性，衝撃強度の向上が著しく，粘り強いコンクリートとなることが知られている．このため，SFRC をトンネル覆工体に適用することにより，覆工厚の減少，鉄筋や金網の省略，漏水防止などが可能となり，トンネルの品質および耐久性の向上が期待できる．このような特長をもつ SFRC は様々な用途に用いられ，平成 12 年度以降では 17 000～22 000 トン／年と鋼繊維の需要が増加してきている．全体の鋼繊維需要量中にトンネルの占める割合は平成 12 年度以降に急激に増加し，現在 70%前後で推移している．この理由は，平成 11 年に相次いだトンネル覆工コンクリートの剥落事故以降，トンネル覆工コンクリートの剥離や剥落の防止，耐久性の確保についての社会的意識が高まり，対策のひとつとしてトンネル覆工コンクリートへの SFRC の採用が増加したためと考えられる．

SFRC を用いたトンネル覆工体は靱性や変形性能が大きく，地山の変動に対して比較的良く追従し，コンクリートの破壊防止に効果があるが，その品質や耐久性を論ずるには，SFRC に発生するひび割れ開口幅について検討を行い，それが所定のひび割れ開口幅以内に収まっていることを確認することが必要である．しかしながら，トンネル覆工体に設計断面力が作用した場合に，覆工体に生ずるひび割れ開口幅を算定する方法が現状では明確でない．

本研究はトンネル覆工体の設計という立場から，設計断面力が作用した場合に覆工体に生ずるひび割れ開口幅の算定法を提案し，トンネル覆工体の耐久性に対する照査を容易にすることを研究目的の一つとしている．

また，SFRC を用いたトンネル覆工体を設計する際には，それに用いる SFRC の引張強度を定めることが必要となる．一般には引張軟化曲線として一様分布モデルや二直線モデルがよく用いられている．二直線モデルは一様分布モデルよりも現実に近い引張軟化曲線であるが，これには土木学会基準などに示される通常の曲げ強度試験に加えて，圧縮ひずみの計測などが必要となることから，曲げ強度試験結果を反映し，かつ，簡易に引張強度を算定できる方法が求められている．本研究は設計実務上の便宜を考え，通常の曲げ強度試験のみで引張強度を算定でき，かつ，曲げ強度試験結果に適合する引張強度の算定法を提案することを二つ目の研究目的とした．なお，本研究で対象としている SFRC はコンクリートに鋼繊維を混入したものであり鉄筋は入っていない，すなわち，鉄筋コンクリートのひび割れ防止のために鋼繊維を混入したものや配力筋の代わりに鋼繊維を入れたものは対象としていない．

本論文は 7 章から構成されており，その概要は以下のとおりである．

第 1 章は序論であり，研究の背景と目的，本研究で対象としている SFRC と想

定している限界状態，および論文の構成について述べている．

第2章では，現状の SFRC 引張軟化曲線の評価法として，引張軟化曲線の各種のモデルについて紹介し，その中でトンネル覆工体に用いられているものは，一様分布モデルと二直線モデルであることを述べている．また，現在行われている SFRC を用いたトンネル覆工体の断面耐力計算法の概要を紹介している．さらに，SFRC を用いたトンネル覆工体の設計における現状の課題として，トンネル覆工体の設計断面力に対応するひび割れ開口幅を簡易に求めること，通常行われている曲げ強度試験のみにより SFRC の引張軟化曲線を求めること，簡便な手法により，SFRC を用いるトンネル覆工体の設計計算ができること，を挙げている．

第3章は，一様分布モデルの引張軟化曲線に基づく覆工体の設計について検討した章である．設計断面力が作用したときのひび割れ開口幅の算定法を提案し，提案した算定法を基に， $M - N$ 性能曲線上およびその内側のひび割れ開口幅の状態を検討し，最大ひび割れ開口幅は限界ひび割れ開口幅 W であること， $M - N$ 性能曲線から原点側に近づくと急激にひび割れ開口幅が低下することなどを明らかにしている．曲げ荷重とひび割れ開口幅との関係を計算から求めた曲線（以降，計算 $P - W$ 曲線という）と，試験により得られる曲線（以降，試験 $P - W$ 曲線という）とを比較して，引張強度算出用の荷重の定め方について提案している．また，実物大の厚さをもつトンネル覆工体の軸圧縮力導入曲げ強度試験を行い，その結果と計算 $P - W$ 曲線を比較することにより，提案したひび割れ開口幅の算定法を検証している．結果として，限界ひび割れ開口幅 W 以下のひび割れ開口幅では，計算 $P - W$ 曲線は試験値に近いことを示している．さらに，一様分布モデルの引張軟化曲線では対応できない課題として，限界ひび割れ開口幅 W を超えるところでの試験 $P - W$ 曲線と計算 $P - W$ 曲線の整合，曲げ強度試験における最大荷重時のひび割れ開口幅が限界ひび割れ開口幅 W を超えるときの対応，が必要なことを述べている．

第4章は，二直線モデルの第2直線の引張軟化曲線に基づく覆工体の設計について検討した章である．まず，引張限界ひずみの変動が覆工の耐力に与える影響について検討した．結果として，その影響はわずかであり，実務上は引張限界ひずみの値をゼロとしてもよいと考えられることを示した．次に，設計断面力が作用したときのひび割れ開口幅の算定法を提案し，提案したひび割れ開口幅の算定法を基に，種々の断面力が作用する状態下におけるひび割れ開口幅の特性を明らかにした．また，従来，引張軟化曲線のパラメータを推定するには，曲げ強度試験時に圧縮縁ひずみを測定することが必要であったが，ここでは曲げ強度試験結果のみから引張軟化曲線のパラメータを推定する方法を提案し，併せて覆工部材の設計の手順を示した．さらに，推定したパラメータの妥当性の検証を目的に，既に発表されているパラメータ推定法との比較を行っている．また，曲げ強度試

験結果から推定された引張軟化曲線のパラメータによる計算結果と実物大の厚さをもつトンネル覆工体の軸圧縮力導入曲げ強度試験結果とを比較し、これらがほぼ整合していることを確認している。最後に、本論文で提案しているひび割れ開口幅の算定法の適合性を検証するために、他の研究者による既発表論文の実験結果との比較を行い、本論文で提案しているひび割れ開口幅の算定法が、既発表論文のものより大きいひび割れ開口幅のところまで適用できることを述べている。

第4章では、一様分布モデルの引張軟化曲線では対応できない課題である「限界ひび割れ開口幅 W を超えるところでの試験 $P - W$ 曲線と計算 $P - W$ 曲線の整合」を図る方法を示している。また、 $M - N$ 性能曲線の内側におけるひび割れ開口幅の状態を、曲げモーメント、軸力、およびひび割れ開口幅の三次元グラフにより視覚的に説明し、これら3者の関係は、限界ひび割れ開口幅 W となる点を頂点とする曲面になり、頂点から外れるとひび割れ開口幅が急激に小さくなることを明らかにした。参考として、曲げ強度試験結果と設計断面力との関係について考察を加え、安全係数を考慮した設計計算では、断面力ばかりでなくひび割れ開口幅に対しても安全性が確保されていることを示した。

第5章では、トリリニアモデルの引張軟化曲線に基づく覆工体の設計について検討している。一様分布モデルの引張軟化曲線では対応できない課題である「曲げ強度試験における最大荷重時のひびわれ開口幅が限界ひび割れ開口幅 W を超えるときの対応」を解決するために、最大曲げ荷重時のひび割れ開口幅の情報を取り入れ、引張軟化曲線としてトリリニア引張軟化曲線を提案している。提案したトリリニアの引張軟化曲線は、FEM を用いず、比較的簡便にそれを推定でき、かつ、覆工体の設計にも容易に取り入れることができることを基本としたものである。

トリリニア引張軟化曲線のパラメータと曲げ強度試験の結果の主要な点との関係を明らかにし、曲げ強度試験結果からトリリニア引張軟化曲線のパラメータを推定する手順を述べている。さらに、トリリニアモデルの引張軟化曲線を用いて設計引張強度を求める方法を提案し、覆工断面耐力の計算、ひび割れ開口幅の算定を行って、提案する方法と第3章で述べた一様分布モデルによる方法とによる覆工断面耐力の比較などを実施している。

第6章は、覆工体の設計において、二直線モデルの第2直線の引張軟化曲線を用いた場合に、SFRCの設計圧縮強度および引張軟化曲線のパラメータが覆工断面耐力に与える影響を調べた章である。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

付録として、SFRCの引張軟化曲線に二直線モデルの第2直線を用いた場合について、円形断面トンネルの設計例を示した。

研 究 業 績

種 類 別	題名， 発表・発行掲載誌名， 発表・発行年月， 連名者（申請者含む）
論文	鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工体のひび割れ開口幅の推定法，土木学会論文集，No.791/ -67, pp.69-80, 2005. 6, 川口博行，木村定雄，小泉 淳
論文	鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工体のひび割れ幅についての一考察，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A, 2003. 3，川口博行
論文	Capacity of Steel Fiber Reinforced Concrete for Extruded Concrete Lining Method, Modern Tunneling Science and Technology, pp.845-850, 2001, H. Kawaguchi, Y. Nagasawa, M. Kurita, M. Watanabe
論文	STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE FOR EXTRUDED CONCRETE LINING METHOD, Japan Concrete Institute, TRANSACTIONS OF THE JAPAN CONCRETE INSTITUTE VOL.22 2000, pp.229-236, H. Kawaguchi, Y. Nagasawa, M. Kurita, M. Watanabe
論文	E C L トンネルに用いる鋼繊維補強コンクリート，コンクリート工学，Vol.38, NO.4, pp.16-21, 2000, 4, 川口博行，長澤保紀，栗田守朗，渡辺真帆
総説	鋼繊維補強コンクリートを用いた E C L 工法，アーバンインフラ・テクノロジー推進会議，第 11 回技術研究発表論文集，pp.207-212, 2000 年，川口博行，宮沢和夫，阿曽利光，西村晋一，渡辺真帆
総説	鋼繊維補強コンクリートを用いた場所打ちライニング工法，土木学会，最近の施工技術・13, pp.49-58, 2000 年 2 月，川口博行，宮沢和夫，阿曽利光，西村晋一，渡辺真帆
総説	トンネル覆工背面の空隙対策技術，電力土木，No.283, pp.114-116, 1999, 川口博行，澤田正雄
講演	鋼繊維補強コンクリートのトンネル覆工への適用に関する研究(1) - 設計用曲げ引張強度の評価に関する検討 -，土木学会第 59 回学術講演会（平成 16 年 9 月），pp.77-78, 岩下尚史，木村定雄，川口博行
講演	場所打ちライニング工法に用いる鋼繊維補強コンクリートの軸圧縮曲げ特性，土木学会第 55 回学術講演会（平成 12 年 9 月），-B120, 長澤保紀，栗田守朗，川口博行，阿曽利光，渡辺真帆
講演	場所打ちライニング工法に用いる鋼繊維補強コンクリート，土木学会第 55 回学術講演会（平成 12 年 9 月），-46, 渡辺真帆，川口博行，阿曽利光，長澤保紀，栗田守朗
講演	SFRC を用いた ECL 工法の覆工体設計法に関する研究(その 1)せん断剛性を持たない構造体による土圧再分配実験，土木学会第 55 回学術講演会（平成 12 年 9 月），-B114, 後藤茂，杉山博一，荻迫栄治，川口博行，阿曽利光
講演	SFRC を用いた ECL 工法の覆工体設計法に関する研究(その 2)繊維補強コンクリート覆工体の遠心模型実験，土木学会第 55 回学術講演会（平成 12 年 9 月），-B115, 杉山博一，後藤茂，林秀彦，川口博行，渡辺真帆
著書	鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル トンネル編 [第 2 版]，技報堂出版，2002，鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル【トンネル編】改訂委員会（小泉淳，他 17 名）

研 究 業 績

種 類 別	題名， 発表・発行掲載誌名， 発表・発行年月， 連名者（申請者含む）
その他 （論文）	三次元沈下曲面を用いたシールド掘進に伴う近接構造物の沈下量予測方法，土木学会，トンネル工学研究論文集第 14 回，pp.131-137，2004 年 11 月，角田浩，森健太郎，川口博行，小川卓，久原高志
その他 （論文）	鋼繊維補強コンクリートトンネル覆工体の耐火性能に関する基礎的研究，土木学会，トンネル工学研究論文・報告集第 13 回，pp.441-446，2003 年 11 月，川口博行，阿曾利光，森田武，西岡真帆
その他 （論文）	Long-distance excavation through a gravel layer right under a railroad, AITES-ITA 2002 World Tunnel Congress, 2002，H. Furukawa, H. Kawaguchi
その他 （論文）	Planning and construction of the large diameter hydraulic tunnel under inner pressure and 0.76 MPa ground water pressure, AITES-ITA 2000 World Tunnel Congress, pp.373-379, 2000，K. Okubo, H. Kawaguchi, T. Okamoto
その他 （論文）	Application of mechanical shield docking method under high water pressure, AITES-ITA 1998 World Tunnel Congress, pp.677-683, 1998，H. Kawaguchi, S. Suzuki
その他 （総説）	C P I セグメント，連載講座 セグメントの新技术，トンネルと地下，Vol.30, No.4，pp.75-77，1999，川口博行，後藤徹
その他 （総説）	マルチ・ブレードリング継手セグメント，連載講座 セグメントの新技术，トンネルと地下，Vol.30, No.2, pp.80-83，1999，川口博行，後藤徹
その他 （総説）	海底下でのシールド地中接合（MSD 工法），大深度地下空間を拓く建設機械と施工技術，（社）日本建設機械化協会，pp.256-263，1999，川口博行，後藤徹
その他 （総説）	シールドルーフ工法，建設機械，1994 年 8 月，pp.61-66，風間広志，川口博行，堀田洋之
その他 （総説）	ミニシールド掘削機によるトンネル施工，ATIC 情報，第 27 号，pp.41-49，土地改良技術情報センター，1992，川口博行
その他 （講演）	ST ジョイント（セグメント間継手）の開発，土木学会第 55 回学術講演会（平成 12 年 9 月），-31，船木暁啓，川口博行，後藤徹
その他 （講演）	C P I セグメントの開発，土木学会第 54 回学術講演会（平成 11 年 9 月），pp.110-111，元木洋，川口博行，後藤徹，松葉忠
その他 （講演）	地下構造物打継目用ベントナイト止水材の開発，土木学会第 54 回学術講演会（平成 11 年 9 月），pp.296-29，阿曾利光，川口博行，渡辺真帆，中村武司
その他 （講演）	ワンタッチ継手（マルチディスク型）の開発，土木学会第 52 回学術講演会（平成 9 年 9 月），pp.176-177，後藤徹，川口博行，金竹隆志，宮沢和夫
その他 （講演）	スパイラル掘進をする複円シールドにおける軸方向剛性の評価，土木学会第 50 回学術講演会（平成 7 年 9 月），pp.1256-1257，川口博行，青山哲也，入田健一郎

研 究 業 績

種 類 別	題名， 発表・発行掲載誌名， 発表・発行年月， 連名者（申請者含む）
その他 （講演）	L N G 配管用大深度シールドトンネルの施工計画，土木学会第 49 回学術講演会（平成 6 年 9 月），pp.400-401，川口博行，小松原徹，青木浩之，辻上修士
その他 （講演）	L N G 配管用大深度シールドトンネルの計画，土木学会第 49 回学術講演会（平成 6 年 9 月），pp402-403，岩崎淳，小松原徹，川口博行，辻上修士
その他 （著書）	シールド工法の調査・設計から施工まで，地盤工学会，1998，シールド工法の調査・設計から施工まで編集委員会（小泉淳，他 14 名）
その他 （特許）	大断面トンネルおよびその構築方法，特許第 3608140 号，平成 16 年 10 月 22 日，風間広志，川口博行，関伸司，井上啓明
その他 （特許）	トンネルおよびその構築方法，特許第 3584416 号，平成 16 年 8 月 13 日，重田安彦，風間広志，川上房男，川口博行，関伸司，竹中久
その他 （特許）	シールド掘進機，特許第 3583263 号，平成 16 年 8 月 6 日，宮沢和夫，川口博行，橋本雅之，久保裕之，田中大三，南雅史，井上年史，古井道夫
その他 （特許）	ワンタッチ継手およびそれを用いたコンクリートユニット，特許第 3572562 号，平成 16 年 7 月 9 日，川口博行，後藤徹，井上啓明
その他 （特許）	大断面トンネルおよびその構築方法，特許第 3567401 号，平成 16 年 6 月 25 日，重田安彦，風間広志，竹中久，川上房男，久保裕之，荒井久雄，川口博行，関伸司，宮沢和夫
その他 （特許）	大断面トンネルおよびその構築方法，特許第 356399 号，平成 16 年 6 月 25 日，重田安彦，風間広志，川上房男，川口博行，関伸司，竹中久
その他 （特許）	シールド掘進機，特許第 3561822 号，平成 16 年 6 月 11 日，川口博行，鈴木実，久原高志，宮沢和夫，久保裕之，荒井久雄
その他 （特許）	大断面トンネルの構築方法及びシールド機，特許第 3516192 号，平成 16 年 1 月 30 日，風間広志，川上房男，重田安彦，川口博行，関伸司，宮沢和夫，他 5 名
その他 （特許）	大断面トンネルおよびその構築方法，特許第 3482625 号，平成 15 年 10 月 17 日，風間広志，川口博行，関伸司，宮沢和夫，川上房男，重田安彦，他 10 名
その他 （特許）	シールドトンネルの覆工方法及びシールド機の妻枠構造，特許第 3309304 号，平成 14 年 5 月 24 日，風間広志，今井実，重田安彦，川上房男，川口博行，石崎秀武，荒砥太吉，大塚正幸，関伸司
その他 （特許）	大断面トンネル構築用シールド機の発進方法および発進立坑，特許第 3177907 号，平成 13 年 4 月 13 日，風間広志，重田安彦，萩原英樹，川口博行，関伸司，石崎秀武，川上房男，尾上篤生，堀田洋之
その他 （特許）	その他（特許）10 件